



近50 kaBP以来西菲律宾海盆沉积物风尘组分对东亚季风演化的响应

丁 怡, 高 伟, 刘 明, 陈竞博, 王飞宇, 车新颖, 范德江

Response of terrigenous eolian dust sediment composition to the East Asian monsoon evolution in the West Philippine Basin since 50 kaBP

DING Yi, GAO Wei, LIU Ming, CHEN Jingbo, WANG Feiyu, CHE Xinying, and FAN Dejiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晚上新世以来菲律宾海盆XT4孔黏土矿物特征及其古环境意义

Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: Evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 42–51

西菲律宾海盆XT06孔第四纪磁性地层与深海沉积动力过程

Magnetostratigraphy of core XT06 and Quaternary sedimentary dynamics of the deep-sea deposits in the West Philippine Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 61–74

海底地形特征对东菲律宾海表层黏土矿物分布的影响

IMPACT OF SEAFLOOR TOPOGRAPHY ON DISTRIBUTION OF CLAY MINERALS IN THE EAST PHILIPPINES SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 77–85

西菲律宾海26万年来古生产力变化的颗石藻证据

Variations of primary productivity in the western Philippine Sea in the past 260000 years:evidence from coccolith

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 113–121

细菌细胞膜脂记录的西太平洋暖池约4 Ma以来沉积物风尘陆源输入变化

Reconstruction of terrestrial input changes in sediments in the Western Pacific warm pool using bacterial membrane lipids

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 52–60

菲律宾海盆磁条带特征及61 Ma以来的海底扩张过程重建

CHARACTERISTICS OF MAGNETIC LINEATIONS AND RECONSTRUCTION OF SEAFLOOR SPREADING PROCESSES OF THE PHILIPPINE SEA BASIN SINCE 61 MA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 30–40



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

丁怡, 高伟, 刘明, 等. 近 50 kaBP 以来西菲律宾海盆沉积物风尘组分对东亚季风演化的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 74-85.
DING Yi, GAO Wei, LIU Ming, et al. Response of terrigenous eolian dust sediment composition to the East Asian monsoon evolution in the West Philippine Basin since 50 kaBP[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 74-85.

近 50 kaBP 以来西菲律宾海盆沉积物风尘组分对东亚季风演化的响应

丁怡¹, 高伟², 刘明^{1,3}, 陈竞博¹, 王飞宇¹, 车新颖¹, 范德江^{1,3}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 国家深海基地管理中心, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 西菲律宾海盆因其特殊的地理位置和环境条件成为研究东亚季风演化的理想区域,但目前对海盆中部沉积物沉积记录演化及其对古气候指示的研究较少。基于对海盆中部两根柱状沉积物 (MC09、MC13) 的 AMS¹⁴C 年代学、沉积物粒度和常量元素的分析,建立了高分辨率的沉积学和地球化学沉积记录,提取了反映亚洲风尘输入的替代性指标,进而揭示了近 50 kaBP 以来西菲律宾海盆沉积物风尘组分对东亚季风演化的响应。结果表明,利用沉积物粒度和元素地球化学综合指标能有效指示东亚季风及源区气候变化,MC09、MC13 柱状样沉积物相关指标的变化表明: 47~26 kaBP, 全球气候处于弱暖期,东亚冬季风强度相对较弱; 26~19 kaBP, 东亚冬季风显著增强,陆源风尘输入增加; 19~12 kaBP, 气温逐渐升高,东亚冬季风强度减弱,沉积记录受到新仙女木事件等的影响出现波动; 12 kaBP 以来,全球气候相对稳定,东亚冬季风强度小幅减弱。本研究可为深入理解古环境和古气候变化对边缘海沉积作用的影响提供参考。

关键词: 陆源风尘; 粒度; 常量元素; 东亚季风; 西菲律宾海盆

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030201](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030201)

Response of terrigenous eolian dust sediment composition to the East Asian monsoon evolution in the West Philippine Basin since 50 kaBP

DING Yi¹, GAO Wei², LIU Ming^{1,3}, CHEN Jingbo¹, WANG Feiyu¹, CHE Xinying¹, FAN Dejiang^{1,3}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China

3. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The West Philippine Basin is an ideal area to study the evolution of the East Asian monsoon due to its special geographical location and environmental conditions. However, there are few studies on the source of sediment and its sedimentary evolution in the middle of the basin. Based on the analysis of AMS¹⁴C chronology, grain size and major elements of two columnar sediments (MC09 and MC13) in the middle of the basin, high-resolution records of sedimentology and geochemical deposition were established, the proxy index reflecting the input of Asian eolian dust was extracted, and then the response of sediment composition of the West Philippine Basin to the evolution of East Asian monsoon since nearly 50 kaBP was revealed. Results show that the comprehensive indexes of sediment grain size and element geochemistry could effectively indicate the changes of the East Asian monsoon and the climate in its source region. The variations of sensitive grain size fractions and terrigenous component fractions of major elements in the MC09 and MC13 columnar sediments indicate that the global climate was in a weak warm period and the East Asian winter monsoon was relatively weak from 47 to 26 kaBP. During 26 to 19 kaBP, the East Asian winter monsoon was obviously strong, and the terrigenous component of sediment increased significantly. From 19 to 12 kaBP, the temperature gradually increased and the intensity of the East Asian monsoon decreased, and the sedimentary record fluctuated under the influence of the Younger Dryas event. Since 12 kaBP, the global climate was relatively stable, and the intensity of winter winds in East Asia had weakened slightly. This study provided a reference for understanding the influence of the paleo-environment and paleo-climate changes on the

资助项目: 教育部重点实验室开放基金“近 30 ka 来西菲律宾海盆中部沉积物风尘组分变化特征及其对东亚古气候演化的响应”(SGPT-20220F-06)

作者简介: 丁怡 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: dingyi970624@163.com

通讯作者: 刘明 (1984—), 男, 正高级实验师, 主要从事海洋沉积学和沉积地球化学研究, E-mail: mingliuouc@163.com

收稿日期: 2023-03-02; 改回日期: 2023-04-03. 张现荣编辑

sedimentation in the marginal sea.

Key words: terrigenous eolian dust; particle size; major elements; East Asian monsoon; West Philippine Basin

西菲律宾海盆地处西太平洋边缘地带、西太平洋暖池北部, 是黑潮流系的发源地, 又受到东亚季风影响, 其沉积记录保存着区域乃至全球环境变化的历史信息, 对全球气候变化的研究具有重要意义^[1-3]。东亚季风在现代气候系统中起着非常重要的作用, 其变化控制着亚洲东部各地风力、降水、河流径流量的季节性差异以及陆地植被覆盖等气候环境变化^[4-5]。西菲律宾海盆四周被大量海岭及海沟环绕, 阻挡了河流搬运陆源物质的输入, 是亚洲风尘重要的“汇”。因此, 该区域被认为是研究风尘记录及其所蕴含古气候意义的理想靶区, 开展沉积物中风尘组分演化特征的研究对于理解东亚季风演化过程具有重要意义。海盆内沉积物主要为黄色、褐色或红褐色深海黏土, 并含有少量火山或岩浆岩碎屑物质, 同时还存在一定比例的生物残渣, 而钙质组分较少^[6]。前人通过粒度^[7-8]、黏土矿物^[9-12]、地球化学^[13-17]等指标对西菲律宾海盆沉积物的来源进行了大量研究, 查明该海区沉积物主要受到周边岛弧火山物质和远端亚洲大陆风尘输入的控制, 并明确了第四纪风尘物质对菲律宾海的输入, 而东亚冬季风在这些风尘物质向西北太平洋输运过程中扮演了重要角色^[1-3,11,14-15]。

由于西菲律宾海盆水深较大, 沉积速率较低, 以往的研究多以百万年尺度为主, 而高分辨率沉积

记录的研究较为缺乏^[1,3,7,11,18-19]。同时, 针对西菲律宾海盆沉积物的研究主要集中在菲律宾海沟附近临近吕宋岛的区域^[12], 而对西菲律宾海盆中部的研究多以表层沉积物的组成和物质来源为主^[6,9,20], 对于历史时期沉积记录演化的研究仍较为薄弱。为此, 本文通过对西菲律宾海盆中部的两根柱状沉积物(MC09、MC13)的研究, 在 AMS¹⁴C 年代学分析的基础上, 建立了高分辨率的沉积物粒度和常量元素沉积记录, 提取了反映亚洲风尘输入的替代性指标, 进而揭示了近 50 kaBP 以来西菲律宾海盆沉积记录对东亚季风演化的响应。这一研究对深入认识西菲律宾海盆沉积物的沉积过程、理解古环境和古气候变化对边缘海沉积作用的影响具有重要科学价值。

1 材料和方法

1.1 研究区概况和样品采集

西菲律宾海盆的范围为 0°~31°N、120°~137°E^[21], 是全球物质和能量交换的重要场所^[22-25]。研究所用沉积物样品是由“深海一号”科学考察船在执行中国大洋第 66 航次任务过程中利用可视多管取样器获取的, 样品沉积连续, 未见明显的沉积间断和浊

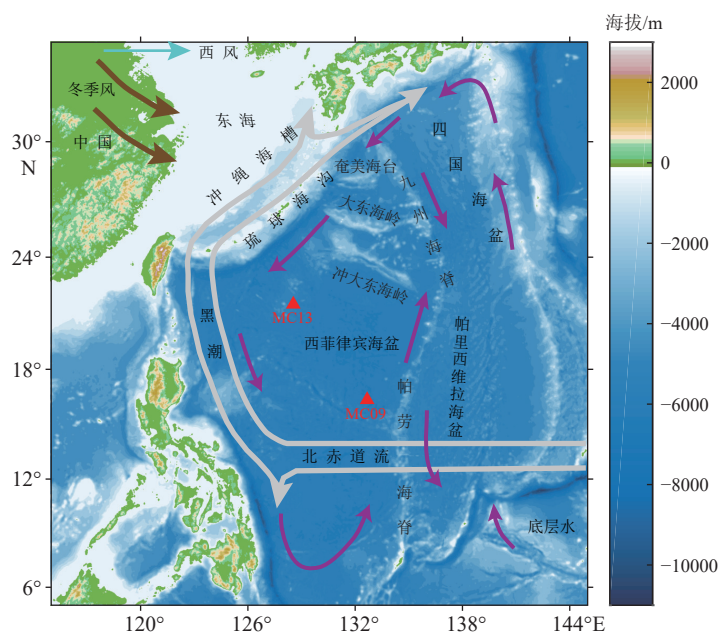


图 1 西菲律宾海盆位置、洋流^[26]及取样站位

Fig.1 Location of the West Philippine Basin and sampling stations

流沉积层。西菲律宾海盆位置和洋流及取样站点见图 1。

MC09 柱状沉积物取自西菲律宾海盆中部, 靠近中央海岭, 水深 5 837 m, 柱长 40 cm, 主要由黄褐、黄绿色粉砂质黏土和泥组成, 部分层位见棕褐色团块。MC13 柱状沉积物取自西菲律宾海盆西北部, 靠近琉球海沟和冲大东海岭, 水深 4 628 m, 长 31 cm, 主要由黄褐色砂质粉砂组成。由于取样水深较大, 均处于太平洋碳酸盐补偿深度 (4 000~4 600 m) 以下^[21], 因而沉积物中未见钙质生物壳体。

1.2 样品处理和测试

柱状沉积物样品获取后置于-20℃冷冻库中保存, 直至进行分样。柱状沉积物的分样工作在中国海洋大学海洋地球科学学院完成。分样时根据不同测试的需求, 同时兼顾沉积层的垂向变化, 以 0.25 cm 或 1 cm 为间隔取样。

由于沉积物中没有提取到足量的钙质生物壳体, 无法使用常规的碳氧同位素来确定年代, 因此本文挑选特定层位进行全样有机质的 AMS¹⁴C 年代测试。测试所用仪器为美国国家静电公司 NEC (National Electrostatics Corporation) 生产的 0.5MV 串联加速器质谱仪, 所用 Modern 化合物标准为国际上通用的 oxalic acid, OXII (SRM 4990C), 并通过二级标准物质¹⁴C 进行空白校正, 每个样品的测试次数至少为 6 次。数据处理采用 NEC 公司的“abc”数据处理软件和美国劳伦斯利弗莫尔 (Lawrence Livermore) 国家实验室开发的“Fudger”数据处理软件。所有样品的数据原始结果为国际通用的 Fraction Modern (FM)。最终根据测定的 FM(F¹⁴C) 计算得到¹⁴C 含量、 $\Delta^{14}\text{C}$ (‰) 和¹⁴C 年龄 (year before present, yrBP), 同时计算出误差值 (σ 值)。样品前期处理、制靶及测试工作在崂山实验室完成。

粒度分析以 0.25 cm 为间隔进行分样, 每个待测样品先加入双氧水去除有机质, 再加入 1 mol/L 的盐酸溶液去除生源碳酸盐组分。为避免硅质生物碎屑可能对测试结果造成的影响, 尽可能地提取沉积物中的陆源组分信息, 在常规粒度前处理基础上再加入 2 mol/L 的碳酸钠溶液并于 85℃ 下恒温水浴 5 h, 去除沉积物中的生物硅。上机测试前, 加入六偏磷酸钠溶液并于超声波振荡仪内完全分散。粒度的测试分析在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成, 采用的仪器是 Mastersizer 2000 型激光粒度仪 (英国 Malvern 公司生产), 仪器测试范围为 0.02~2 000 μm , 重复测量

相对误差小于 3%。

常量元素采用 1 cm 间隔分样, 将沉积物样品 (全样) 以 106℃ 烘干约 48 h 至样品完全干燥后研磨至小于 200 目, 称取 4.0 g 样品, 放置于标准的样品杯 (直径 32 mm) 中压制成片, 之后上机进行测试。分析测试工作在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成, 测试仪器为台式偏振 X 射线荧光光谱仪 (德国 SPECTRO 公司, SPECTRO XEPOS 型)。测试过程中采用国家海洋沉积物标准物质 GBW07315 和平行样做质量监控, 测试误差和标准偏差均小于 5%。

2 结果

2.1 测年结果及年代框架

由于海洋沉积物有机质来源复杂, 外源有机质的输入会导致沉积物全样有机质 AMS¹⁴C 年代学测定的结果与实际存在差异^[27]。西菲律宾海盆四周环绕的海沟、海脊有效阻挡了陆源有机质的输入^[28], 沉积物中的有机质多以原生为主, 一定程度上减小了外源输入的影响^[24]。经计算得出, 2 根柱状沉积物的平均沉积速率分别为 0.86 和 0.99 cm/ka, 与开阔大洋^[29]及本研究区的沉积速率相近^[11,30-31], 因此可以证明测年结果的可信度。在此基础上, 利用线性内插法和外推法分别构建出柱状沉积物的年代学框架, 获得了记录近 50 kaBP 以来西菲律宾海盆的沉积年代序列 (图 2)。

2.2 沉积物粒度特征

MC09、MC13 柱状沉积物的平均粒径、分选系数、偏度和峰度等 4 项粒度参数的垂向变化如图 3 所示。整体来看, 2 根柱状沉积物均以粉砂为主, 各项粒度参数呈阶段性波动变化。MC09 柱状沉积物中粉砂组分平均含量可达 55.1%, 黏土组分次之, 砂含量最低, 平均仅为 7.2%; 平均粒径整体波动较大, 为 3.15~26.82 μm , 平均值为 7.57 μm ; 分选较差, 分选系数的平均值为 1.83; 偏态呈阶段性变化, 变化范围为-1.93~1.76, 平均值为-0.75; 峰态的平均值为 2.31, 表明粒度频率分布曲线窄而高。MC13 柱状沉积物中粉砂的含量最高, 平均为 59.3%; 砂和黏土次之, 平均含量均在 20% 左右; 平均粒径的波动较大, 平均值为 17.02 μm ; 分选系数的平均值为 2.07, 分选差; 偏态的变化范围为 1.17~1.86, 平均值为 1.54, 为正偏态; 峰态很窄, 垂向分布稳定。

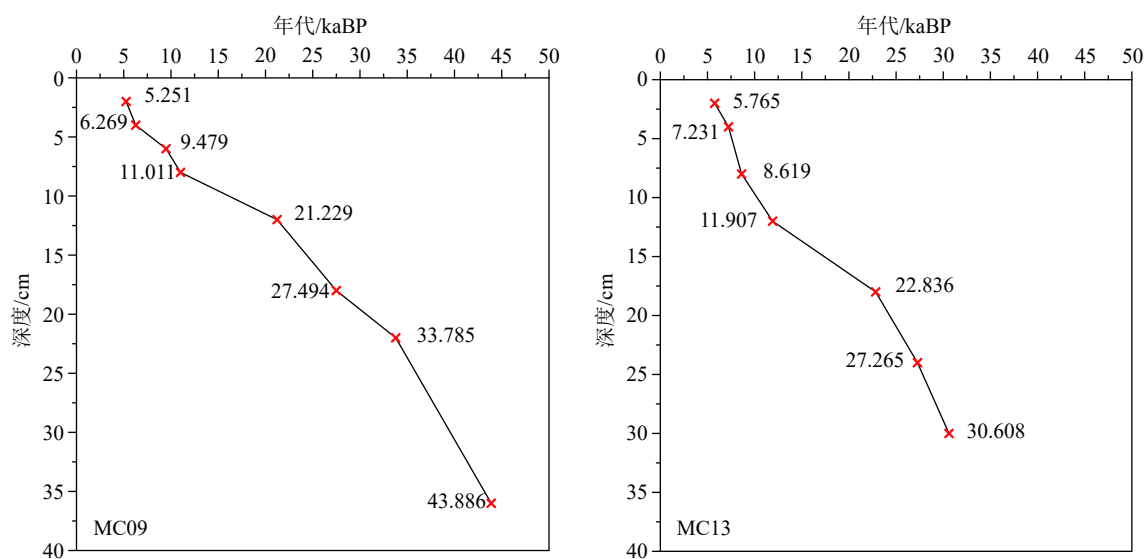


图 2 基于线性内插法和外推法得出的柱状沉积物年代框架

Fig.2 Chronological framework based on linear interpolation and extrapolation methods

2.3 常量元素

对 2 根柱状沉积物的 10 种常量元素分布特征进行研究 (图 4)。MC09 柱状沉积物中, SiO_2 含量最高, 平均含量为 19.93%; 其次为 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 平均含量分别为 7.96% 和 5.19%; CaO 、 MnO 、 TiO_2 和 P_2O_5 的含量相对较低, 均 $< 1\%$, 其中 P_2O_5 的平均含量最低, 为 0.11%。从垂向变化来看, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 的含量基本呈现出同步变化, 而 SiO_2 、 MgO 、 P_2O_5 和 Na_2O 的含量变化趋势与之相反, CaO 含量基本保持稳定, MnO 含量的变化趋势与其他元素存在一定差异。

MC13 柱状沉积物中, SiO_2 含量最高, 平均为 19.26%; 其次为 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 平均含量分别为 7.05% 和 3.27%; MnO 、 P_2O_5 和 TiO_2 的含量极低, 均 $< 0.5\%$, 其中 P_2O_5 的含量最低, 平均仅为 0.08%。从垂向变化来看, SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 和 K_2O 的含量基本呈现出同步变化, Na_2O 的含量变化趋势与之相反, 同时 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 和 MnO 的含量基本呈现出同步变化, CaO 含量基本保持稳定。

3 讨论

3.1 沉积物陆源风尘组分敏感粒级的提取

沉积物粒度分布展示出显著的多峰态, 可能表示有多种不同来源物质的混合, 也可能表示同一物源但受到不同动力条件的作用, 其敏感的粒级组分及特征可用于有效反映不同影响因素的作用, 成为

古环境研究的重要手段^[32]。前人采用 Weibull 拟合函数、端元粒度模型和粒径-标准偏差法等方法对沉积物粒度的敏感粒级进行了提取, 识别出了河流输入、风尘、浊流及火山物质的敏感粒级, 开展了沉积物来源和沉积环境演变的研究^[33-35]。其中粒级-标准偏差法使用最为广泛, 且易于获取更全面的信息, 因此本文采用该方法分别对 2 根柱状沉积物的陆源风尘碎屑的敏感粒级组分进行了提取。

本文对共计 284 个沉积物粒度数据 (其中 MC09 160 个、MC13 124 个) 进行分析后得出标准偏差随粒级组分变化的规律, 曲线呈现出典型的“多峰分布”, 表明沉积物粒度受到了多种因素的影响 (图 5)。对于 MC09 柱状沉积物来说, 4 个明显的标准偏差峰值分别对应的粒级为 0.90、3.61、48.98、550.60 μm , 据此将 MC09 划分为超细粒组分 ($< 1.51 \mu\text{m}$)、细粒组分 ($1.51 \sim 12.21 \mu\text{m}$)、粗粒组分 ($12.21 \sim 230.41 \mu\text{m}$) 和超粗粒组分 ($> 230.41 \mu\text{m}$)。MC13 柱状沉积物中存在 4 个明显的标准偏差峰值, 对应粒级为 0.90、3.61、34.28、115.48 μm 。根据以上特征点, 将 MC13 划分为 4 部分, 分别为超细粒组分 ($< 1.27 \mu\text{m}$)、细粒组分 ($1.27 \sim 12.21 \mu\text{m}$)、粗粒组分 ($12.21 \sim 41.13 \mu\text{m}$) 和超粗粒组分 ($> 41.13 \mu\text{m}$)。

一般认为, 深海沉积物中的粗粒组分和超粗粒组分是近源形成的产物, 而西菲律宾海盆是一个封闭的沉积环境, 缺乏大规模的洋流活动, 远离大陆和河口^[28]。利用粒级-标准偏差法分离出的粗粒级组分均为 $> 30 \mu\text{m}$, 与研究区附近海域分布的代表喷发性火山物质的组分 (众数约 40 μm) 相似^[8]。因此, 本文认为西菲律宾海盆沉积物中的粗粒组分和

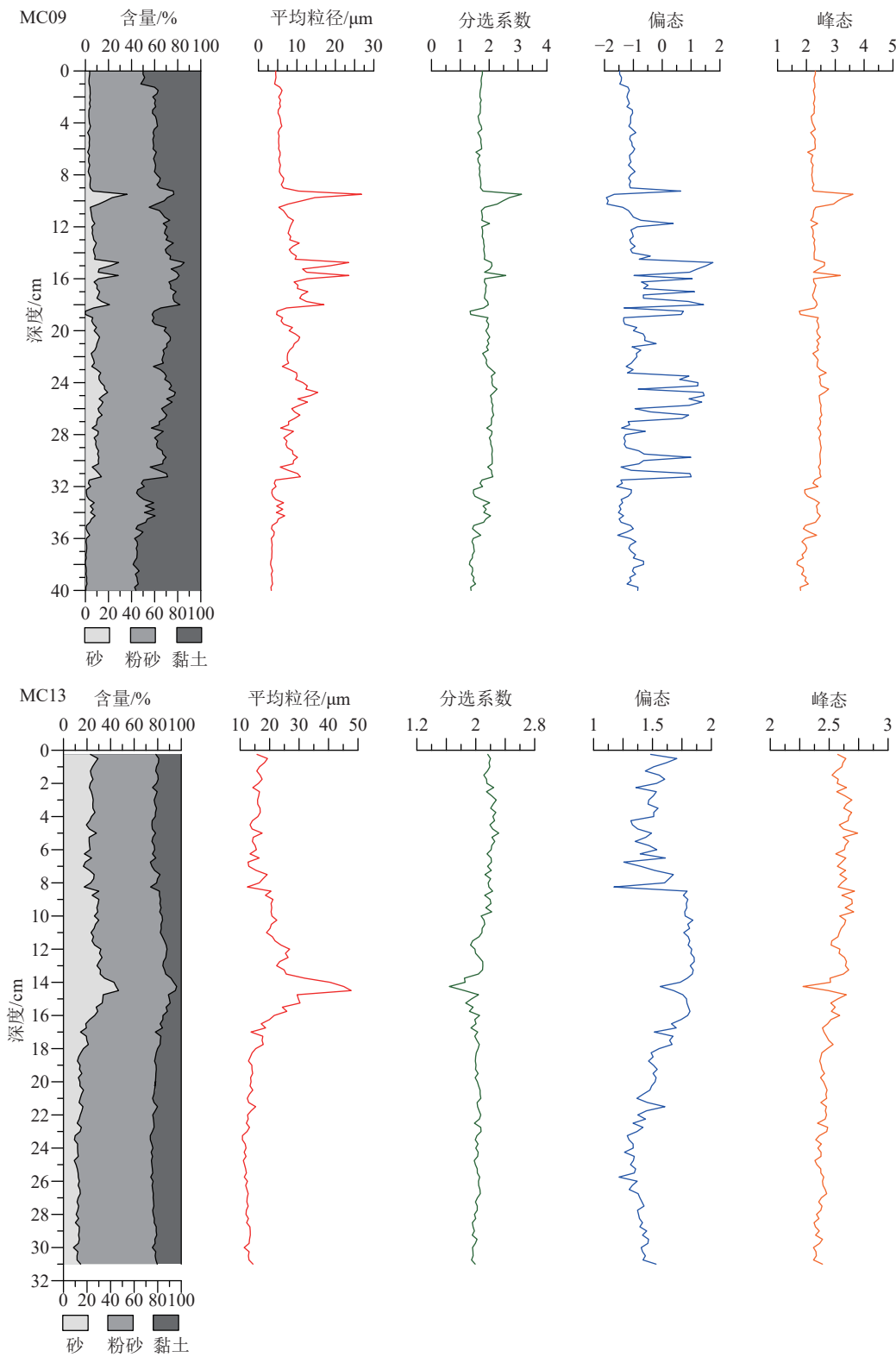


图 3 柱状沉积物岩性变化和粒度参数变化曲线

Fig.3 The variation of grain-size composition and parameters of the columnar samples

超粗粒组分主要为附近海脊和岛弧的火山物质。

以往大量研究表明, 适合由风进行长距离运输的物质颗粒粒径一般小于 16 μm , 众数粒径为 2~4 μm ^[36]。经对比发现, 本文提取到的 2 个细粒组分

与之粒度分布特征相似, 均表现为粒度较细、变化范围较窄等特征。因此, 本文认为西菲律宾海盆沉积物中的细粒组分主要是来自亚洲大陆的风尘物质。

海洋沉积物中的超细粒组分通常有 2 种成因:

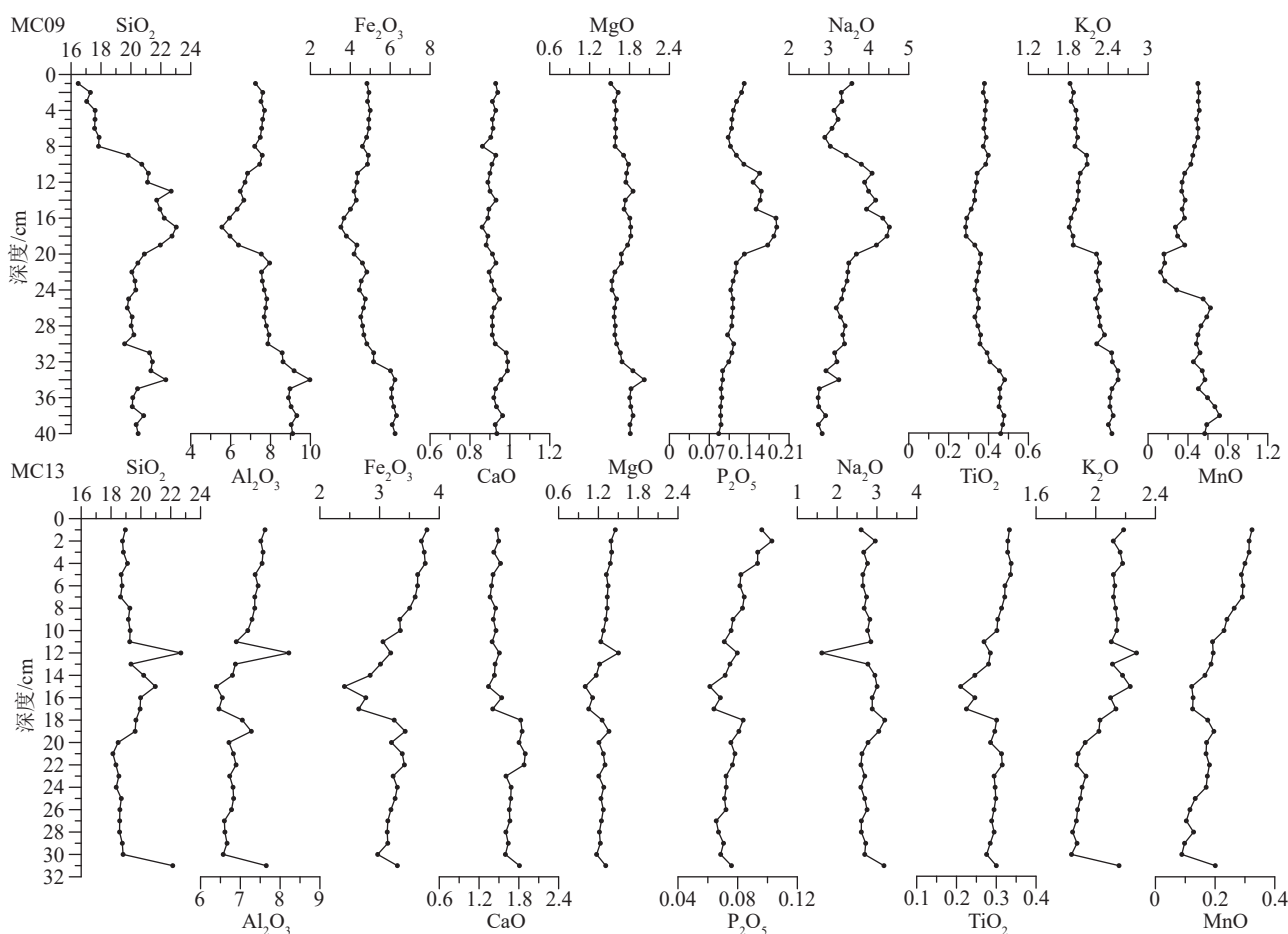


图 4 柱状沉积物常量元素垂向变化图

图中元素含量单位为 %。

Fig.4 Depth profiles of major elements of the columnar samples

The unit for the elements is %.

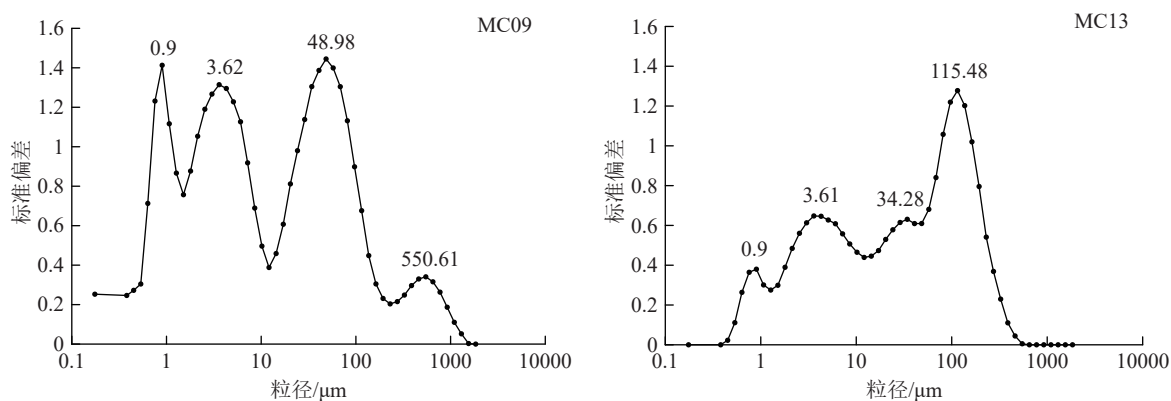


图 5 柱状沉积物粒径-标准偏差曲线

Fig.5 Curves of standard deviation vs the grain size of the columnar samples

一是来自中国黄土高原的黄土和古土壤粘附在较粗的风尘颗粒表面被搬运到沉积区^[37-39],二是热液成因或安山质碎屑的海洋自生黏土^[40-42]。在 MC09 柱状沉积物中,超细粒组分($<1.51\ \mu\text{m}$)含量变化与代表火山物质的粗粒组分($12.21\sim 230.41\ \mu\text{m}$)存在

一定的负相关性($R^2=0.711$)(图 6),因此认为超细粒组分为海洋自生黏土^[8]。而在 MC13 柱状沉积物中,超细粒组分($<1.27\ \mu\text{m}$)含量变化与代表亚洲风尘的细粒组分($1.27\sim 12.21\ \mu\text{m}$)之间存在强正相关性($R^2=0.966$)(图 6),因此认为超细粒组分为中国黄

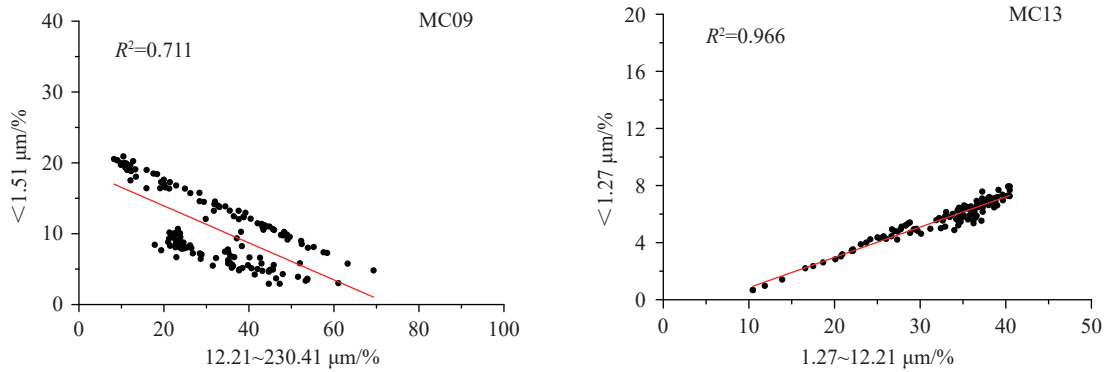


图 6 柱状沉积物不同粒级组分的相关性图解
Fig.6 Correlation between different size fractions of the columnar samples

土和古土壤中的超细组分。

3.2 沉积物陆源风尘组分因子的提取

沉积物的元素地球化学特征是研究沉积物物质组成的重要指标之一,不同的元素及其组合特征反映了不同的沉积环境条件和变迁,是气候地质事件内在成因和环境信息的综合体现和良好标志。本文应用 SPSS 26 软件对 2 根柱状沉积物共计 71 个样品的常量元素含量进行了 R 型因子分析,根据特征值大于 1 的原则,经方差极大正交旋转后,2 根柱状沉积物均获得 3 个主因子,其累计方差贡献率分别为 90.36% 和 87.86%,表明此次因子分析的效果比较理想(表 1)。

MC09 柱状沉积物的 R 型因子分析结果显示, F1 主因子的方差贡献为 43.66%,对沉积物的影响占主导地位,元素组合为正载荷的 K₂O、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃ 和 TiO₂,负载荷的 Na₂O 和 P₂O₅。Al₂O₃ 与 TiO₂ 通常被认为是陆源物质的代表^[20,43-44], K₂O 则与沉积物中的黏土矿物(如伊利石)有关^[20,45],前人研究也证明了该区域的伊利石主要来自于亚洲风尘^[1,13],负载荷的元素组合常为火山物质指征,说明该因子主要代表的是陆源风尘的影响。F2 主因子的方差贡

献为 26.52%,元素组合为正载荷的 MnO、TiO₂ 和 Fe₂O₃。一般认为,沉积物中 MnO 含量变化主要受热液作用^[46]和海底沉积物早期成岩作用的影响^[47],在研究区附近的沉积物中发现了一定量的铁锰结核,因此认为该因子主要代表了海洋自生物质。F3 主因子的方差贡献为 20.18%,元素组合为正载荷的 MgO 和 SiO₂。MgO 常赋存于火山碎屑物质(如玄武岩)中^[48-49],而 SiO₂ 在黏土类矿物和碎屑矿物中都有赋存,结合二者在 F1 端元(代表陆源风尘)中较低的含量,认为该因子主要代表了附近火山碎屑物质。

MC13 柱状沉积物的 R 型因子分析结果显示, F1 主因子的方差贡献率为 49.80%,其组合是 Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂、P₂O₅、MnO 和 MgO,且均为正载荷。研究表明,研究区沉积物中的 Fe₂O₃、MgO 和 TiO₂ 多赋存于表生环境下地球化学性质比较稳定的火山碎屑物质中^[48-49]。一般认为, P₂O₅ 常以重要的营养元素形式出现,但其在铁锰结核中也大量富集^[50],且 P₂O₅ 与 MnO、Fe₂O₃ 都具有非常高的相关性,因此本文认为该因子中 P₂O₅ 和 MnO 代表的是海洋自生铁锰结核。因此, F1 因子主要代表了火山源物质和海洋自生物质的影响。F2 主因子的方差贡献为

表 1 柱状沉积物常量元素 R 型因子分析结果
Table 1 Results of R-mode factor analysis for major and trace elements of the columnar samples

编号	公因子	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	方差贡献
MC09	F1	0.04	0.88	0.70	0.06	0.77	-0.70	0.94	0.66	0.25	-0.80	43.66%
	F2	-0.39	0.47	0.68	0.31	0.20	-0.56	0.09	0.70	0.84	-0.43	26.52%
	F3	0.89	0.005	0.09	0.93	0.06	0.38	0.22	0.10	-0.06	0.37	20.18%
MC13	F1	-0.31	0.76	0.99	0.87	-0.03	-0.14	0.21	0.94	0.88	0.92	49.80%
	F2	0.66	0.41	-0.12	0.03	-0.76	0.07	0.96	-0.26	0.42	0.19	23.99%
	F3	0.52	0.46	0.03	0.46	0.17	-0.82	0.08	0.05	-0.10	-0.03	14.07%

23.99%, 其组合是 K_2O 和 CaO , 其中 K_2O 为正载荷, CaO 为负载荷。如前文所述, K_2O 的富集多与陆源黏土矿物密切相关, 因此认为该因子主要代表了陆源风尘物质的影响。而负载荷的 CaO 可能说明了生物成因碳酸盐组分对陆源风尘物质的稀释作用对陆源风尘物质的稀释作用^[20]。F3 主因子的方差贡献为 14.07%, 元素组合为负载荷的 Na_2O , 前人研究表明其峰值与火山活动之间存在着较好的指示关系^[51], 因此认为该因子主要代表了火山碎屑物质的影响。

由常量元素 R 型因子分析结果可知, 研究区沉积物主要来自于附近火山碎屑物质及陆源风尘物质, 生物及海洋自生作用的影响则相对较小。同时, 从结果中还可以看出 MC09 柱状沉积物受到东亚季风的影响更为显著, 而 MC13 柱状沉积物则更多地受到来自火山物质的影响。这与 2 根柱状沉积物的取样位置相一致, 即远离岛弧的沉积物更多受到季风搬运的陆源风尘组分的影响, 而距离岛弧较近的沉积物则更多受到火山物质的影响。不同位置的两个柱状沉积物岩心的综合分析, 可以更为全面地反映研究区沉积作用的影响因素。

3.3 西菲律宾海盆沉积记录对东亚冬季风演化的响应

西菲律宾海盆沉积物中的陆源风尘组分主要来源于亚洲内陆干旱地区的碎屑沉积物, 由东亚冬季风携带至此。当东亚冬季风增强时, 风尘源区的干旱程度及物理风化强度增加, 导致物质汇聚区海洋沉积物中的陆源风尘物质比例增加; 相反, 当东亚冬季风减弱时, 风尘源区的干旱程度及物理风化强度降低, 物质汇聚区海洋沉积物中的陆源风尘物质比例降低^[16,43-44]。

近年来, 大量研究表明利用菲律宾海沉积物敏感粒级和常量元素 R 型因子分析来指示东亚季风的演化历史是可行的。于兆杰等^[7]运用粒级-标准偏差方法对西菲律宾海陆源沉积物组成及其对过去一百万年以来东亚季风和亚洲内陆气候的指示进行了探讨; 王晨等^[17]利用 R 型因子分析对西菲律宾海盆 XT-4 孔沉积物指示的陆源物质输入和东亚季风的演化历史进行了研究。因此, 本文结合沉积物敏感粒级和常量元素 R 型因子分析两个角度对沉积物指示的陆源物质进行综合研究, 进一步揭示东亚季风的演化历史。

如前文 3.1 节所述, 2 根柱状沉积物中的细粒组分可以代表陆源风尘物质, 本文将其组分的平均粒

径作为反映东亚冬季风强度变化的指标。如前文 3.2 节所述, MC09 柱状沉积物中, Al_2O_3 和 K_2O 等与陆源风尘物质密切相关的元素在 F1 因子中均表现为正载荷, 因此 F1 因子得分增高(降低)则说明了沉积物中陆源风尘物质比例的增高(减少), 进而指示风尘源区干旱程度的加剧(减小)和东亚冬季风的增强(减弱)。同理可知, MC13 柱状沉积物中与陆源风尘物质密切相关的 K_2O 为正载荷, 因此 F2 因子得分的变化趋势也同样可以指示风尘源区和东亚冬季风的演化, 本文分别提取出 2 根柱状沉积物各自的陆源因子得分, 进而指示东亚冬季风的演化。

中国黄土、深海沉积物和风尘通量是目前进行季风演化研究的基础性指标。中国黄土序列以其粒度细、沉积速率高和良好的连续性等特征, 被认为是蕴含丰富古环境信息的晚新生代陆相沉积物之一^[52]; 而风尘通量不会受到构造、洋流、海平面等因素影响, 它的变化能够更加真实地反映出季风强度及对应风尘源区的气候变化信息^[36]。为进一步验证本文提取的替代性指标指示东亚冬季风强度变化的可行性, 将其与中国黄土高原泾源黄土剖面沉积物的中值粒径^[53]及北太平洋 V21-146 风尘通量^[54]进行了系统对比(图 7)。通过对比发现, 替代指标与这二者的变化趋势总体上一致, 均表现出显著的冰期-间冰期旋回特征, 从而表明了本文提取出的多种替代性指标的有效性。当然, 需要指出的是, 陆源因子得分指标和全球氧同位素曲线^[55]、相对海平面^[54]、黄土中值粒径^[53]及北太平洋风尘通量^[54]之间在某些变化细节上仍然存在有一定的差异, 这可能是因为受到年代控制点以及沉积序列中可能出现的沉积速率变化的影响。

基于上述分析, 本文综合运用指示风尘组分的敏感粒级组分平均粒径和常量元素陆源因子得分作为东亚季风演化的替代性指标, 进一步分析上述指标所代表的亚洲大陆风尘输入及东亚冬季风强度的变化情况, 将近 50 kaBP 以来的变化分为 4 个阶段(图 7)。

(1) 47~26 kaBP: 该阶段处于末次冰期, 对应深海氧同位素第 3 阶段晚期(MIS 3a)和第 2 阶段(MIS 2)早期的一部分, 海平面较低并且在不断波动下降。此时全球气候处于弱暖期, 气温较此前的 MIS 4 和之后的 MIS 2 有所升高, 但上升的幅度较弱, 与末次间冰期仍有一定差距^[55]。大约 29 ka 时的 MIS 3/MIS 2 转换阶段, 东亚冬季风强度显著增大, 这一变化在黄土中有着一致的记录。该阶段风尘组分的敏感粒级平均粒径波动增大, 与泾源黄土中值粒

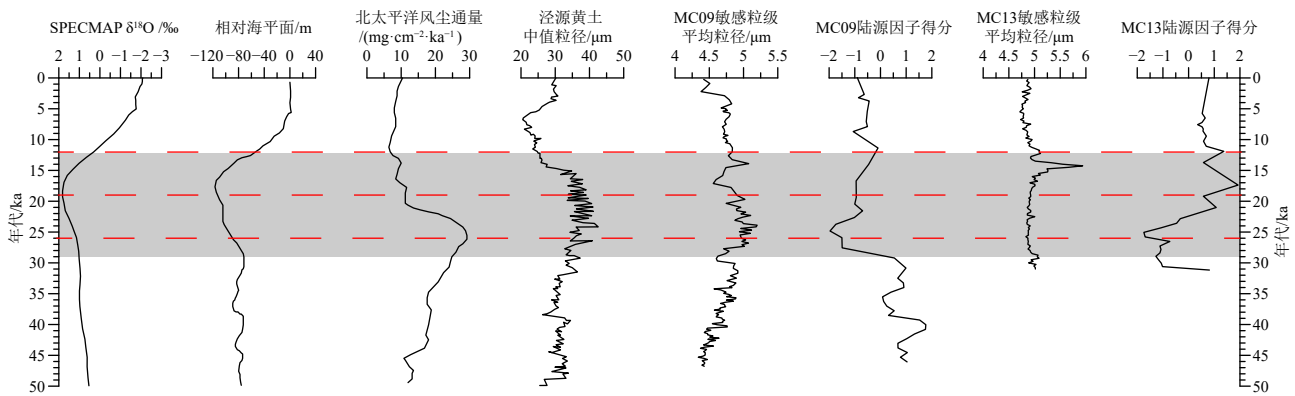


图7 西菲律宾海盆柱状沉积物敏感粒径、陆源因子得分与全球氧同位素曲线^[55]、相对海平面^[55]、泾源黄土中值粒径^[52]和北太平洋风尘通量^[54]对比

灰色区域指示 MIS 2 阶段^[57-58], 红色虚线为各阶段的分界。

Fig.7 Comparison of mean grain size and eolian dust factor of the columnar samples to the global oxygen isotope curves, relative sea level fluctuation, mean grain size of the Jingyuan Loess section and the eolian flux

The gray area indicates the MIS 2 stage^[57-58], and the red dashed line is the boundary between the stages.

径曲线的变化趋势高度一致, 常量元素陆源因子得分呈现波动下降趋势, 表现出陆源物质输入的波动下降, 但整体来看陆源物质输入量为最大。本文分析认为, 可能是由于此时较弱的东亚季风无法携带大颗粒的陆源物质, 只能将细颗粒风尘物质搬运至研究区。而 Al、Ti 等典型的指示陆源的元素又受到“粒度控制律”的作用^[56], 大量富集在细粒物质中, 导致了该阶段沉积记录中陆源因子得分的高值。

(2) 26~19 kaBP: 该阶段包括了整个末次冰盛期, 对应深海氧同位素第 2 阶段(MIS 2), 海平面剧烈降低达到最低值, 低于现在海平面 120 m 左右。该阶段风尘组分的敏感粒径平均粒径继续升高, 常量元素因子得分呈现稳定上升趋势, 表现出陆源物质供给丰富。此时, 海平面显著降低, 东亚冬季风强度显著增强, 亚洲大陆气候也开始向寒冷干燥转变, 随着亚洲内陆干旱化程度进一步加剧, 研究区沉积的亚洲风尘物质也逐渐增多。

(3) 19~12 kaBP: 该阶段是从末次冰盛期向全新世过渡的时期, 对应深海氧同位素第 2 阶段(MIS 2), 全球气温和海平面都逐渐升高。该阶段风尘组分的敏感粒径平均粒径呈现波动增加趋势, 常量元素因子得分呈现波动升高趋势。同时, 大致在 13 kaBP 左右替代指标出现明显的波动, 尤其是反映风尘组分的敏感粒径有显著的增大, 应该与新仙女木事件有关, 这一末次冰消期持续升温过程中的突然降温事件导致了陆源风尘组分的增加和平均粒径的增大。

(4) 12 kaBP 以来: 该阶段是末次冰期结束后至今的一段时期, 即全新世, 对应深海氧同位素第 1 阶段(MIS 1), 全球气温和海平面继续升高。进入

全新世后, 全球气候逐渐变暖, 海平面迅速上升, 全新世高海平面的形成使得研究区相对远离亚洲大陆, 东亚季风强度减弱。该阶段风尘组分的敏感粒径平均粒径呈现波动减小趋势, 常量元素因子得分基本稳定, 表现出该阶段东亚冬季风强度基本保持稳定但仍存在小幅度波动减弱。

需要注意的是不同替代性指标在对气候演变的指示上存在一定的差异, 这主要是由于古环境、古气候对不同指标的影响机制和程度不尽相同所导致的, 且存在较多干扰因素, 如物源的变化、海平面的波动等。因此, 建立高精度的年代学框架, 明确研究区沉积物物源及水动力条件的变化, 有效提取沉积物中古气候、古环境信息是进一步研究的关键。

4 结论

(1) 沉积物敏感粒径的平均粒径、常量元素陆源组分因子得分具有较为相似的变化趋势, 共同记录了东亚冬季风的演化历史。本研究表明了采用沉积学、地球化学的综合替代性指标对于恢复海洋古环境的有效性, 可在一定程度上弥补单一指标的局限性。

(2) MC09、MC13 柱状样沉积物风尘组分的敏感粒径组分平均粒径和陆源因子得分的变化表明: 47~26 kaBP, 全球气候处于弱暖期, 东亚冬季风强度相对较弱; 26~19 kaBP, 东亚冬季风显著增强, 且亚洲风尘源区干旱程度加剧; 19~12 kaBP, 东亚季风强度波动减弱; 12 kaBP 以来, 东亚冬季风强度相对稳定但仍小幅波动减弱。

参考文献 (References)

- [1] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [2] Jiang F Q, Frank M, Li T G, et al. Asian dust input in the western Philippine Sea: evidence from radiogenic Sr and Nd isotopes [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14 (5): 1538-1551.
- [3] Yu Z J, Wan S M, Colin C, et al. Co-evolution of monsoonal precipitation in East Asia and the tropical Pacific ENSO system since 2.36 Ma: new insights from high-resolution clay mineral records in the West Philippine Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 45-55.
- [4] Wang B, Clemens S C, Liu P. Contrasting the Indian and East Asian monsoons: implications on geologic timescales [J]. *Marine Geology*, 2003, 201 (1-3): 5-21.
- [5] Clift P D, Plumb R A. The Asian Monsoon: Causes, History and Effects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [6] 鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 西菲律宾海盆表层沉积物中的轻碎屑分区及物质来源 [J]. *地质论评*, 2007, 53 (6): 765-773. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. Provinces and material provenance of light detritus in the surficial sediments from the western Philippine Sea [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (6): 765-773.]
- [7] 于兆杰, 万世明, 孙晗杰, 等. 近百万年来亚洲风尘在西菲律宾海的沉积物粒度记录 [J]. *地球环境学报*, 2012, 3 (2): 792-800. [YU Zhaojie, WAN Shiming, SUN Hanjie, et al. Grain-size records of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3 (2): 792-800.]
- [8] 周焯, 蒋富清, 南青云, 等. 奄美三角盆地晚更新世以来碎屑沉积物粒度特征及其物源和古气候意义 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31 (3): 298-309. [ZHOU Ye, JIANG Fuqing, NAN Qingyun, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Amami Sankaku Basin since late pleistocene and its provenance and palaeoclimate implications [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (3): 298-309.]
- [9] Kolla V, Nadler L, Bonatti E. Clay mineral distributions in surface sediments of the Philippine Sea [J]. *Oceanologica Acta*, 1980, 3 (2): 245-250.
- [10] 石学法, 陈丽蓉, 李坤业, 等. 西菲律宾海西部海域粘土沉积物的成因矿物学研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15 (2): 61-72. [SHI Xuefa, CHEN Lirong, LI Kunye, et al. Study on minerageny of the clay sediment in the west of Philippine Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15 (2): 61-72.]
- [11] Xu Z K, Li T G, Wan S M, et al. Evolution of East Asian monsoon: clay mineral evidence in the western Philippine Sea over the past 700 kyr [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 188-196.
- [12] 舒雨婷, 郑玉龙, 许冬, 等. 西菲律宾海盆 I8 孔黏土矿物的物源分析 [J]. *海洋学研究*, 2015, 33 (4): 61-69. [SHU Yuting, ZHENG Yulong, XU Dong, et al. The provenance of clay minerals in core I8 from the West Philippine Basin [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2015, 33 (4): 61-69.]
- [13] Mahoney J B. Nd and Sr isotopic signatures of fine-grained clastic sediments: a case study of western Pacific marginal basins [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 182 (1-4): 183-199.
- [14] Seo I, Lee Y I, Yoo C M, et al. Sr-Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: implications for the transport mechanism of Asian dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119 (19): 11492-11504.
- [15] Xu Z K, Li T G, Clift P D, et al. Bathyal records of enhanced silicate erosion and weathering on the exposed Luzon shelf during glacial lowstands and their significance for atmospheric CO₂ sink [J]. *Chemical Geology*, 2018, 476: 302-315.
- [16] 徐兆凯, 李铁刚, 于心科, 等. 近 700ka 来西菲律宾海沉积物来源和东亚季风演化的常量元素记录 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (9): 1044-1052. [XU Zhaokai, LI Tiegang, YU Xinke, et al. Sediment provenance and evolution of the East Asian winter monsoon since 700 ka recorded by major elements in the West Philippine Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (9): 1044-1052.]
- [17] 王晨, 徐方建, 胡邦琦, 等. 3.7 Ma 以来西菲律宾海 XT-4 孔沉积物元素特征及其古环境指示意义 [J]. *海洋科学*, 2020, 44 (8): 205-214. [WANG Chen, XU Fangjian, HU Bangqi, et al. Elemental geochemistry of Core XT-4 sediments from the western Philippines Sea since 3.7 Ma and its paleoenvironmental implications [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44 (8): 205-214.]
- [18] Xu Z K, Li T G, Wan S M, et al. Geochemistry of rare earth elements in the mid-late Quaternary sediments of the western Philippine Sea and their paleoenvironmental significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (4): 802-812.
- [19] Xu Z K, Li T G, Clift P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16 (9): 3182-3196.
- [20] 徐兆凯, 李安春, 李铁刚, 等. 东菲律宾海表层沉积物常量元素组成及地质意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (6): 43-48. [XU Zhaokai, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Major element compositions of surface sediments in the east Philippine Sea and its geological implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30 (6): 43-48.]
- [21] 李常珍, 李乃胜, 林美华. 菲律宾海的地势特征 [J]. *海洋科学*, 2000, 24 (6): 47-51. [LI Changzhen, LI Naisheng, LIN Meihua. Terrain features of the Philippine sea [J]. *Marine Sciences*, 2000, 24 (6): 47-51.]
- [22] Berger W H. Deep-Sea sedimentation [M] // Burk C A, Drake C L. The Geology of Continental Margins. Berlin Heidelberg: Springer, 1974: 213-241.
- [23] Xu Z K, Wan S M, Colin C, et al. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level low stands: forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 232: 106211.
- [24] 徐兆凯, 张寒月, 常凤鸣. 第四纪黑潮源区沉积物的源-汇过程、主要控制因素及其碳循环效应 [J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52 (2): 287-297. [XU Zhaokai, ZHANG Qianyu, CHANG Fengming. Sedimentary source-sink processes, dominant controlling factors, and their car-

- bon cycle in the Kuroshio source region in the Quaternary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(2): 287-297.]
- [25] 徐兆凯, 张蓁月, 常凤鸣. 156 ka以来西菲律宾海陆坡沉积物的定量源—汇过程及其碳循环效应[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 18-27. [XU Zhaokai, ZHANG Qianyu, CHANG Fengming. Quantitative source-to-sink processes and carbon cycling effect of sediment on the continental slope of the western Philippine Sea since 156 ka [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(11): 18-27.]
- [26] 朱潇, 蒋富清, 冯旭光, 等. 菲律宾海沉积物中石英的来源及其搬运方式[J]. 海洋与湖泊, 2018, 49(6): 1190-1202. [ZHU Xiao, JIANG Fuqing, FENG Xuguang, et al. The provenance and transportation of quartz in the Philippines Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(6): 1190-1202.]
- [27] Vandergoes M J, Newnham R M, Preusser F, et al. Regional insolation forcing of late Quaternary climate change in the Southern Hemisphere [J]. *Nature*, 2005, 436(7048): 242-245.
- [28] 吴时国, 范建柯, 董冬冬. 论菲律宾海板块大地构造分区[J]. 地质科学, 2013, 48(3): 677-692. [WU Shiguo, FAN Jianke, DONG Dongdong. Discussion on the tectonic division of the Philippine Sea Plate [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 677-692.]
- [29] Hung G W, Chung Y C. Sedimentation rates on the continental slope off eastern Taiwan [J]. *Marine Geology*, 1994, 119(1-2): 99-109.
- [30] 葛淑兰, 石学法, 杨刚, 等. 西菲律宾海780ka以来气候变化的岩石磁学记录: 基于地磁场相对强度指示的年龄框架[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1040-1052. [GE Shulan, SHI Xuefa, YANG Gang, et al. Rock magnetic response to climatic changes in West Philippine Sea for the last 780 ka: based on relative paleointensity assisted chronology [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1040-1052.]
- [31] 丁雪, 胡邦琦, 徐方建, 等. 晚上新世以来菲律宾海盆XT4孔黏土矿物特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(1): 42-51. [DING Xue, HU Bangqi, XU Fangjian, et al. Evolution of clay minerals assemblages since Late Pliocene and its paleoenvironmental implications: evidence from Core XT4 of the Philippine Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(1): 42-51.]
- [32] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [33] 孙东怀, 鹿化煜. 晚新生代黄土高原风尘序列的粒度和沉积速率与中国北方大气环流演变[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 251-262. [SUN Donghuai, LU Huayu. Grain-size and dust accumulation rate of late Cenozoic aeolian deposits and the inferred atmospheric circulation evolutions [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 251-262.]
- [34] Prins M A, Vriend M, Nugteren G, et al. Late Quaternary Aeolian dust input variability on the Chinese Loess Plateau: inferences from unmixing of loess grain-size records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2): 230-242.
- [35] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报, 2003, 48(2): 184-187. [SUN Youbin, GAO Shu, LI Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 184-187.]
- [36] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic Eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [37] 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 928-936. [SUN Donghuai. Supper-fine grain size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 928-936.]
- [38] Sun D H, Su R X, Bloemendal J, et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic Aeolian sequences in northern China: implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 264(1-2): 39-53.
- [39] Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits[M]. London: Academic Press, 1987.
- [40] Ziegler C L, Murray R W, Hovan S A, et al. Resolving eolian, volcanogenic, and authigenic components in pelagic sediment from the Pacific Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 254(3-4): 416-432.
- [41] Severmann S, Mills R A, Palmer M R, et al. The origin of clay minerals in active and relict hydrothermal deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(1): 73-88.
- [42] Ling H F, Jiang S Y, Frank M, et al. Differing controls over the Cenozoic Pb and Nd isotope evolution of deepwater in the central North Pacific Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 232(3-4): 345-361.
- [43] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212(3-4): 331-342.
- [44] Wei G J, Li X H, Liu Y, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(4): PA4214.
- [45] 李国胜, 杨锐, 张洪瑞. 中太平洋第四纪沉积物地球化学特征及沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(3): 33-43. [LI Guosheng, YANG Rui, ZHANG Hongrui. Geochemistry and sedimentary environments of the quaternary sediments in the mid-Pacific Ocean [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(3): 33-43.]
- [46] 孟宪伟, 夏鹏, 张俊, 等. 近1.8 Ma以来东亚季风演化与青藏高原隆升关系的南海沉积物常量元素记录[J]. 科学通报, 2010, 55(34): 3328-3322. [MENG Xianwei, XIA Peng, ZHANG Jun, et al. Evolution of the East Asian monsoon and its response to uplift of the Tibetan Plateau since 1.8 Ma recorded by major elements in sediments of the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(34): 3328-3322.]
- [47] 韦刚健, 李献华, 刘颖, 等. 沉积物成岩蚀变过程中的Mn、Cd和Mo元素活动特征: 以ODP 1148站钻孔沉积物记录为例[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 129-135. [WEI Gangjian, LI Xianhua, LIU Ying, et al. Transfer patterns of Mn, Cd and Mo in sediments during early diagenesis: evidences from sediment cores at ODP Site 1148 [J]. *Geochimica*, 2005, 34(2): 129-135.]
- [48] Wood D A, Matthey D P, Joron J L, et al. A geochemical study of 17 selected samples from basement cores recovered at Sites 447, 448, 449,

- 450 and 451, Deep Sea Drilling Project Leg 59[M]//Kroenke L, Scott R B, Balshaw K, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 59. U. S. Govt. Printing Office, 1981.
- [49] Castillo P R, Newhall C G. Geochemical constraints on possible subduction components in Lavas of Mayon and Taal Volcanoes, Southern Luzon, Philippines [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45 (6): 1089-1108.
- [50] 杨锐, 李国胜, 张洪瑞. 中太平洋CC区表层沉积物的地球化学[J]. *地质与资源*, 2007, 16 (3): 200-208. [YANG Rui, LI Guosheng, ZHANG Hongrui. Analysis on the geochemical characteristics and material origin of the surface sediments in the mid-Pacific Ocean [J]. *Geology and Resources*, 2007, 16 (3): 200-208.]
- [51] 束振华, 杨守业, 窦衍光, 等. 冲绳海槽DGKS9604孔酸不溶相中常量元素组成及环境指示意义[J]. *热带地理*, 2009, 29 (3): 236-240, 273. [SHU Zhenhua, YANG Shouye, DOU Yanguang, et al. Geochemical compositions and paleoenvironmental implication of the residual fractions of core DGKS9604 sediments in the Middle Okinawa Trough [J]. *Tropical Geography*, 2009, 29 (3): 236-240, 273.]
- [52] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416 (6877): 159-163.
- [53] Sun Y B, Wang X L, Liu Q S, et al. Impacts of post-depositional processes on rapid monsoon signals recorded by the last glacial loess deposits of northern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289 (1-2): 171-179.
- [54] Hovan S A, Rea D K, Pisias N G. Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in northwest Pacific sediments [J]. *Paleoceanography*, 1991, 6 (3): 349-370.
- [55] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record[M]//Berger A. *Milankovitch and Climate*. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1984: 269-305.
- [56] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. *Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1994.]
- [57] 谢一璇, 杨小强, 张伙带, 等. 西太平洋深海沉积物记录的 ~ 80 ka以来风尘物质输入与东亚冬季风强度[J]. *古地理学报*, 2019, 21 (5): 855-868. [XIE Yixuan, YANG Xiaoqiang, ZHANG Huodai, et al. Eolian input and East Asian winter monsoon records in deep-sea sediment from Western Pacific since ~ 80 ka [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2019, 21 (5): 855-868.]
- [58] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. *中国科学 (D 辑)*, 1997, 40 (6): 662-668. [YAO Tandong, Thompson L G, SHI Yafeng, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40 (6): 662-668.]